

SÉRIE A, n° 1960

N° D'ORDRE :

2827

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

RAYMOND GRANDMONTAGNE

Agrégé de physique, Professeur au Lycée du Parc, Lyon.

1^{re} THÈSE. — ETUDES PHOTOÉLECTRIQUES SUR LA LUMIÈRE DU
CIEL NOCTURNE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 17/10 1941 devant la Commission d'examen

MM. CH. FABRY.....	Président.
G. BRUHAT.....	} Examineurs.
J. CABANNES.....	

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1941

SÉRIE A, N° 1960

N° D'ORDRE :

2827

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

RAYMOND GRANDMONTAGNE

Agrégé de physique, Professeur au Lycée du Parc, Lyon.

1^{re} THÈSE. — ETUDES PHOTOÉLECTRIQUES SUR LA LUMIÈRE DU
CIEL NOCTURNE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **1941** devant la Commission d'examen

MM. CH. FABRY.....	<i>Président.</i>
G. BRUHAT.....	} <i>Examineurs.</i>
J. CABANNES	

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1941

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire M. MOLLIARD.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe.



H. LEBESGUE.	MARCHIS.	WINTREBERT.
Émile PICARD.	VESSIOT.	DUBOSQ.
Léon BRILLOUIN.	PORTIER.	BOHN.
PÉCHARD.	MOLLIARD.	RABAUD.
FREUNDLER.	LAPICQUE.	CAULLERY.
AUGER.	G. BERTRAND.	J. PERRIN.
DANGEARD.	Ch. FABRY.	E. CARTAN.
LESPIEAU.	Léon BERTRAND.	

PROFESSEURS

Émile BOREL.....	† Calcul des probabilités et Physique mathématique.	PRENANT.....	† Anatomie et Histologie comparées.
A. COTTON.....	† Recherches physiques.	VILLEY.....	Mécanique physique et expérimentale.
J. DRACH.....	† Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	COMBES.....	† Physiologie végétale.
Charles PÉREZ....	† Zoologie.	GARNIER.....	† Application de l'Analyse à la géométrie.
M. GUICHARD.....	† Analyse et mesures chimiques.	PÈRES.....	Mécanique théorique des fluides
Paul MONTEL.....	† Théorie des fonctions.	HACKSPILL.....	† Chimie minérale.
L. BLARINGHEM..	† Botanique.	TOUSSAINT.....	Technique Aéronautique
G. JULIA.....	† Mécanique analytique et Mécanique céleste	M. CURIE.....	Physique (P. C. B.).
C. MAUGUIN.....	† Minéralogie.	G. RIBAUD.....	† Hautes températures.
A. DENJOY.....	† Géométrie supérieure.	CHAZY.....	† Mécanique rationnelle.
L. LUTAUD.....	† Géographie physique et géologie dynamique.	H. GAULT.....	Chimie (P. C. B.).
G. BRUHAT.....	† Physique théorique et physique céleste.	CROZE.....	Recherches physiques.
E. DARMOIS.....	† Enseignement de Physique.	DUPONT.....	† Théories chimiques.
A. DEBIERNE.....	† Physique Générale et Radioactivité.	LANQUINE.....	† Géologie structurale et géologie appliquée.
A. DUFOUR.....	† Physique (P. C. B.).	VALIRON ..	Mathématiques générales.
L. DUNOYER.....	† Optique appliquée.	BARRABÉ.....	Géologie structurale et géologie appliquée.
A. GUILLIERMOND.	† Botanique.	MILLOT.....	Biologie animale (P.C.B.).
M. JAVILLIER.....	† Chimie biologique.	F. PERRIN.....	Théories physiques.
Henri VILLAT.....	† Mécanique des fluides et applications.	VAVON.....	Chimie organique.
Ch. JACOB.....	† Géologie.	G. DARMOIS.....	Calcul des probabilités et Physique-Mathématique.
P. PASCAL.....	† Chimie générale.	CHATTON.....	† Biologie maritime.
M. FRÉCHET.....	† Calcul différentiel et Calcul intégral.	AUBEL.....	Chimie biologique.
E. ESCLANGON....	† Astronomie.	Jacques BOURCART.	Géographie physique et Géologie dynamique.
M ^{me} RAMART-LUCAS	† Chimie organique.	M ^{me} JOLIOT-CURIE.	Physique générale et Radioactivité.
H. BÉGHIN.....	† Mécanique physique et expérimentale.	PLANTFOL.....	Biologie végétale (P.C.B.).
FOCH.....	† Mécanique expérimentale des fluides.	CABANNES.....	Enseignement de Physique.
PAUTHENIER.....	Physique (P. C. B.).	GRASSÉ.....	† Biologie animale. Évolution des êtres organisés.
De BROGLIE.....	† Théories physiques.	PRÉVOST.....	Chimie (P.C.B.).
CHRÉTIEN.....	Optique appliquée.	BOULIGAND.....	Mathématiques.
LABROUSTE.....	Physique du Globe.	CHAUDRON.....	Chimie (P. C. B.).

Secrétaire..... A. PACAUD.

Secrétaire honoraire..... D. TOMBECK.

A MONSIEUR JEAN DUFAY

Ma très cordiale reconnaissance.

ÉTUDES PHOTOÉLECTRIQUES SUR LA LUMIÈRE DU CIEL NOCTURNE

Par RAYMOND GRANDMONTAGNE

Agrégé de Physique, Professeur au Lycée du Parc, Lyon.

SOMMAIRE. — L'auteur a utilisé la cellule photoélectrique à l'étude de la lumière du ciel nocturne. Les différentes régions du spectre sont isolées par des filtres colorés. L'enregistrement photographique des déviations de l'électromètre est automatique au cours d'une nuit.

Dans le domaine étudié (de 3 500 à 9 000 Å) l'auteur a mis en évidence l'importance des radiations de grande longueur d'onde qui rapproche le rayonnement du ciel de celui d'un corps noir à 2 000° K. Ce résultat l'a conduit à retoucher la valeur admise jusque-là pour la brillance moyenne du ciel. La valeur exacte est 10^{-7} bougie par centimètre carré, d'où résulte un éclaircissement comparable à celui que produit une bougie placée à 16 m.

La formule qui exprime la variation annuelle de la brillance dans l'intervalle total 5 850-9 000 Å est en excellent accord avec celle qu'avaient déjà donnée Lord Rayleigh et Spencer Jones. La brillance est maximum en automne.

Les radiations de l'intervalle $\lambda\lambda$ 5 850-9 000 transportent la plus grande partie de l'énergie émise. Pour étudier les variations de couleur, l'auteur a donc évalué les intensités dans les régions spectrales $\lambda\lambda$ 3 500-5 000 et $\lambda\lambda$ 5 850-6 800 par rapport à l'intensité dans l'intervalle $\lambda\lambda$ 5 850-9 000. Le rapport $I_{3\,500-5\,000} : I_{5\,850-9\,000}$ varie assez peu, tandis qu'on observe au contraire de grandes variations pour le rapport $I_{5\,850-6\,800} : I_{5\,850-9\,000}$, avec minimum en été. On en conclut que les changements de couleur sont dus à des changements de brillance dans le début au rouge, qu'il faut attribuer à la raie 6 300 Å de l'oxygène.

Au cours de ces recherches l'auteur a montré comment le ciel passe du bleu au rouge pendant le crépuscule. Le crépuscule de la région rouge se termine lorsque le soleil est à 14° sous l'horizon, tandis que le crépuscule de la région bleue se prolonge jusque vers 17°. De curieuses discontinuités ont été constatées dans l'évolution de la lumière à la fin du crépuscule.

CHAPITRE PREMIER

Introduction.

Les cellules photo-électriques ont été fort peu utilisées dans les recherches relatives à la lumière du ciel nocturne qui se sont multipliées depuis une vingtaine d'années ⁽¹⁾.

Lord Rayleigh ⁽²⁾ le premier s'en est servi en 1929 pour faire quelques mesures de brillance du ciel nocturne. Puis, en 1936, C. T. Elvey et ses collaborateurs ⁽³⁾ ⁽⁴⁾ ont appliqué systématiquement la cellule photo-électrique à l'étude de la lumière zodiacale et à celle de la répartition de la brillance sur la voûte céleste. Ils ont utilisé une cellule au potassium.

Je décris dans ce mémoire les divers photomètres très différents de ceux d'Elvey que j'ai construits depuis 1935, et j'expose les résultats qu'ils m'ont permis d'obtenir. Les cellules sensibles au rouge et au début de l'infra-rouge que j'ai utilisées se sont montrées des récepteurs commodes et assez souples pour se prêter à des enregistrements réguliers. Elles m'ont conduit à des résultats nouveaux concernant une région spectrale encore à peu près inexplorée de la lumière du ciel nocturne.

⁽¹⁾ Je ne peux mieux faire que de renvoyer le lecteur aux deux publications suivantes, pour avoir tous les renseignements sur les travaux concernant la lumière du ciel nocturne :

Ch. Fabry a donné l'historique des travaux antérieurs à 1934 dans l'opuscule édité par la *Revue d'Optique* en 1934 ⁽¹⁾ ;

J. Dufay analyse les travaux les plus récents dans un rapport au Congrès de l'Union Astronomique Internationale de 1938 ⁽³³⁾.

Mes mesures concernent :

- a) la couleur du ciel nocturne et ses variations ;
- b) la brillance du ciel nocturne et ses variations diurnes et annuelles ;
- c) la décroissance de la brillance du ciel au cours du crépuscule pour diverses régions spectrales.

Ce travail a été effectué à l'Observatoire de Lyon (Saint-Genis-Laval ; latitude $45^{\circ}42'$, longitude 0 h. 19 m. 8 s. E, altitude 290 m.).

Je suis heureux de témoigner ici de toute la reconnaissance que j'é dois à M. J. Dufay. Il a constamment dirigé mes études avec une autorité et une cordialité qui m'ont été extrêmement précieuses. Je remercie le personnel de l'Observatoire de Lyon de l'aide qu'il m'a prodiguée lui aussi pendant des années et je ne saurais oublier le Laboratoire de Physique Générale de la Faculté dont les directeurs, le regretté M. Thovet et M. Dejardin, ont guidé mes premiers pas.

Préliminaires.

PREMIÈRE PARTIE

Eclairement produit par une voûte sphérique sur une surface horizontale placée au centre.

Un élément M de surface sphérique de rayon R est défini par ses coordonnées, distance zénithale ζ et azimut θ (fig. 1).

Sa surface ds est fonction des accroissements $d\zeta$ et $d\theta$:

$$ds = R^2 d\zeta \sin \zeta d\theta$$

$\text{cm}^2 \quad \text{cm}$

Si la brillance de cet élément est $\mathcal{B}$ (fonction de ζ et θ) en bougies par centimètre carré, le flux envoyé sur 1 cm^2 de surface horizontale représente l'éclairement de cette sur-

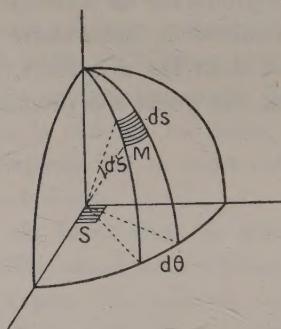


Fig. 1.

face par l'élément ds , $dE = \mathcal{B} ds d\omega$, où $d\omega$ est l'angle solide sous lequel on voit, depuis M, le centimètre carré de surface horizontale :

$$d\omega = \frac{1}{R^2} \cos \zeta ;$$

donc :

$$dE = \mathcal{B} R^2 \sin \zeta d\zeta d\theta \frac{1}{R^2} \cos \zeta$$

$$dE = \mathcal{B} \frac{\sin 2\zeta}{2} d\zeta d\theta ;$$

dE représente l'éclairement en phots.

Pour une surface finie on aura l'éclairement en phot (ou lumen par cm^2) :

$$E = \int \int \mathcal{B} \frac{\sin 2\zeta}{2} d\zeta d\theta.$$

Les cas particuliers envisagés plus loin sont :

— La brillance est uniforme,

$$E = \frac{\mathcal{B}}{2} \int \int \sin 2\zeta d\zeta d\theta.$$

— On considère une calotte sphérique limitée au cercle de distance zénithale ζ ,

$$E = \frac{\mathcal{B}}{2} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{\zeta=0}^{\zeta=\zeta} \sin 2\zeta d\zeta d\theta$$

$$E = \frac{\mathcal{B}\pi}{2} (1 - \cos 2\zeta);$$

et pour toute la demi-sphère,

$$E = \mathcal{B}\pi.$$

DEUXIÈME PARTIE

Calcul du courant photoélectrique à attendre du ciel nocturne.

La cellule reçoit la lumière du ciel sur une surface que je supposerai horizontale et plane. Il n'est pas difficile de calculer le flux lumineux envoyé par le ciel sur chaque centimètre carré de la cellule. En désignant par $\mathcal{B}$ la brillance du ciel en bougies par centimètre carré, que l'on suppose uniforme pour simplifier, et en supposant que la cellule reçoive la lumière envoyée par la portion de ciel comprise entre le zénith et le cercle de distance zénithale ζ , l'éclairement en phot est alors, d'après le calcul précédent :

$$E = \frac{\pi}{2} \mathcal{B} (1 - \cos 2\zeta).$$

Le courant donné par la cellule est proportionnel au flux lumineux reçu (de toutes façons ce courant est très faible et s'exprimera en microampères par lumen). Si nous désignons par $S \text{ cm}^2$ la surface utile et par K le courant en ampères pour un lumen, le courant que la cellule pourra fournir sera :

$$I = KSE.$$

La sensibilité de la cellule est fixée par la nature même de sa cathode sensible. Nous avons employé des cellules donnant environ 10 microampères par lumen, soit $K = 10^{-5}$ environ. D'après mes mesures $\mathcal{B} = 10^{-7}$ bougie/cm² environ, ce qui conduit à l'expression :

$$I = 10^{-12} \frac{\pi}{2} (1 - \cos 2\zeta) S.$$

Pour augmenter le courant j'ai songé à prendre un très grand angle sur le ciel. La plus grande partie de mes mesures a été faite avec $\zeta = 21^\circ$ et comme surface $S = 4 \text{ cm}^2$. Les courants à mesurer sont donc de l'ordre de 10^{-12} ampère.

Il est évident qu'en augmentant la surface S on augmente proportionnellement le courant. Je n'ai pas utilisé de « cellule géante », mais j'ai employé dans certaines mesures un objectif rudimentaire de grande surface lorsque l'angle à prendre sur le ciel était petit ⁽¹⁾. Dans certains cas, il peut être avantageux, en effet, de n'utiliser qu'une région du ciel peu étendue. J'ai alors projeté une image du ciel sur la cellule avec un objectif rudimentaire de grande ouverture relative. Avec $\zeta = 6^\circ$ environ et un diamètre de 22 cm pour l'objectif le courant photoélectrique est du même ordre que ci-dessus.

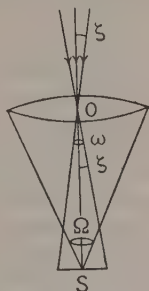


Fig. 1 bis.

⁽¹⁾ Si on néglige le coefficient de transmission de l'objectif O (fig. 1 bis) l'éclairement de l'image du ciel située sur la fenêtre de la cellule en S est Ω , où Ω est l'angle solide sous lequel on voit l'objectif depuis son plan focal : Ω ne dépend que de l'ouverture relative de l'objectif. L'angle solide utilisé sur le ciel est au contraire ω , angle sous lequel on voit la fenêtre S de la cellule depuis l'objectif O. Cet angle ω est inversement proportionnel au carré de la distance focale de l'objectif. Il suffit donc que Ω soit le même que l'angle embrassé par la cellule employée sans objectif pour disposer à peu près du même éclairement de la cellule. L'angle utilisé sur le ciel est alors diminué en allongeant la distance focale de l'objectif sans changer son ouverture relative (ce qui augmente rapidement les dimensions de l'objectif).

CHAPITRE II

Appareillage.

Je commencerai par décrire les photomètres enregistreurs employés et par indiquer dans chaque cas la technique de leur utilisation.

Les sources lumineuses de comparaison employées méritent aussi une mention détaillée, nécessaire pour l'explication d'une partie des résultats acquis.

Les préoccupations qui m'ont guidé dans ces réalisations n'apparaîtront au lecteur qu'au cours de l'exposé des résultats et de leur discussion. Si je n'avais pas craint d'alourdir considérablement le texte, j'aurais procédé par ordre purement chronologique, expliquant chaque fois la difficulté nouvelle et la solution nouvelle imaginée pour l'éviter. J'étais sûr en procédant ainsi d'être à la fois plus obscur et moins utile. Le lecteur voudra bien tenir compte de cette remarque dans la suite.

DESCRIPTION DES PHOTOMÈTRES

Trois appareils ont été construits que je numérotai : 1, 2, 3, dans l'ordre chronologique. Les numéros 1 et 2 sont des enregistreurs automatiques. Le numéro 3 est un photomètre à lectures directes, léger et peu encombrant qui a été utilisé pour des mesures accessoires. Chacun a subi au cours de sa vie bien des modifications de détail.

Le numéro 1 a été l'appareil d'essais et de mise au point : il a permis de construire le numéro 2 en toute connaissance de cause. Il a en même temps servi à acquérir presque tous les résultats exposés plus loin.

Je commencerai par la description de l'appareil n° 2 con-

sidéré comme type définitif du photomètre enregistreur automatique à cellule photoélectrique pour étude du ciel nocturne et du crépuscule (5).

Photomètre n° 2.

Principe. — Dans tous mes photomètres j'ai adopté l'usage d'un électromètre mesurant la différence de potentiel aux bornes d'une résistance de fuite.

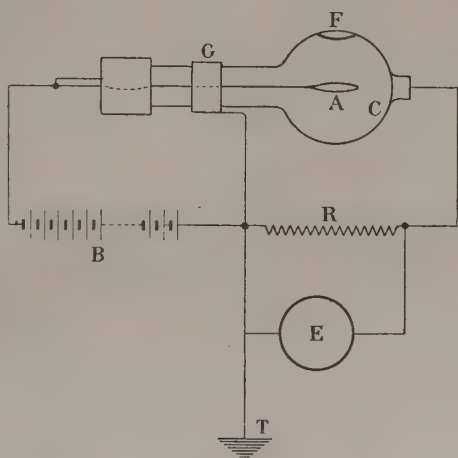


Fig. 2.

Le schéma du circuit est représenté figure 2, valable pour tous les instruments : la cellule débite sur une résistance R ; l'électromètre mesure la différence de potentiel aux bornes de cette résistance.

La cellule. — On doit rechercher la plus grande sensibilité compatible avec les autres conditions d'utilisation : en particulier, l'appareil étant destiné à être dehors et à subir toutes les variations de température, on doit chercher à diminuer leur influence. Je ne citerai que pour mémoire la dessiccation obligatoire pour obtenir des isollements conve-

nables (même sur l'ambre). La cellule au césium pur, très sensible, est d'un emploi à peu près impossible à cause de son courant thermoionique plus élevé, dès la température ordinaire, que le courant photoélectrique à mesurer, et dont la compensation devient illusoire si l'appareil doit subir des variations de température. Le refroidissement de la cellule n'a pas été envisagé par raison de simplicité.

Les mesures ne sont faites que lorsque la lune est absente, aussi l'appareil ne sert-il que quelques jours par mois. Dans le but d'avoir des mesures aussi comparables que possible sur des intervalles de temps de l'ordre d'un an et plus, les cellules à atmosphère gazeuse ont été aussi écartées. Leur courant n'est d'ailleurs pas rigoureusement proportionnel au flux reçu.

Nous avons décidé de nous arrêter à une cellule Philips au rubidium dans le vide. Sa sensibilité nominale n'est que de 12 microampères par lumen et son seuil photoélectrique vers $10\,000\text{ \AA}$. Son courant thermoionique est pratiquement nul.

Une cellule à alliage de césium ayant à peu près les mêmes caractéristiques a été utilisée sur le n° 1. Mais son courant thermoionique a toujours été un peu gênant.

D'autre part la résistance intérieure de la cellule doit être très grande devant la résistance de fuite, ce qui interdit l'usage de cellules à couche d'arrêt.

Les cellules dites « techniques » utilisées couramment dans l'industrie cinématographique ont une résistance intérieure trop faible pour convenir. On doit donc prendre des cellules spécialement construites pour l'usage du laboratoire avec un isolement très soigné. L'anneau de garde, isolant l'anode de la cathode, est un accessoire utile. La cellule sera également placée dans une enceinte desséchée.

L'ultra-violet n'ayant pas été étudié dans ce travail, on a pris des cellules de verre et non de quartz.

La résistance. — Cet accessoire doit posséder des qualités

exceptionnelles : valeur élevée et insensibilité aux variations de température.

Plus la résistance est élevée, plus l'appareil est sensible. Mais il vient un moment où sa constante de temps devient trop grande pour conduire à un équilibre dans un temps raisonnable. Il convient donc de chercher à réduire la capacité de la cellule comme celle de l'électromètre. Les cellules de laboratoire ont des capacités de quelques centimètres. L'électromètre ne doit pas avoir plus. On cherchera aussi à éviter la capacité des fils de connexion.

Les résistances utilisées ont été $1,8 \cdot 10^{12}$ ohm et $1,4 \cdot 10^{11}$ ohm pour la nuit ; $2,8 \cdot 10^{10}$ ohms et $5,2 \cdot 10^9$ ohms pour le crépuscule.

Il est très intéressant de faire varier la sensibilité de l'instrument en faisant varier la résistance plutôt que de faire varier l'ouverture ou la brillance du faisceau à l'aide de diaphragmes ou de lames absorbantes dont l'action n'est pas la même dans les différentes régions du spectre.

Les résistances SS White ont rempli les conditions requises.

Le temps nécessaire pour atteindre 99 o/o de la déviation est 20 secondes avec la résistance de $1,4 \cdot 10^{11}$ ohm.

Un changement automatique de résistance est prévu pour adapter la sensibilité à la lumière traversant le filtre employé.

L'électromètre. — D'après ce qui précède il doit être sensible et de faible capacité ; en outre la température ne doit avoir que peu d'influence sur lui.

La différence de potentiel à mesurer est du dixième de volt environ dans les conditions d'emploi. Pour la mesurer au centième près, l'électromètre doit atteindre le millivolt.

Pour son insensibilité assez grande à la variation de température, le type Lindemann a été choisi. Sa capacité est faible et sa sensibilité suffisante. Son très faible encombrement est aussi un avantage et son fonctionnement est assuré avec

moins de 100 volts ce qui est accessoirement intéressant, car les piles nécessaires n'occupent pas beaucoup de place.

Réalisation. — L'appareil répond aux exigences suivantes :
 orientation dans toutes les directions ;
 ouverture et fermeture automatiques ;
 mise en marche de l'enregistrement à l'ouverture ;
 arrêt à la fermeture ;

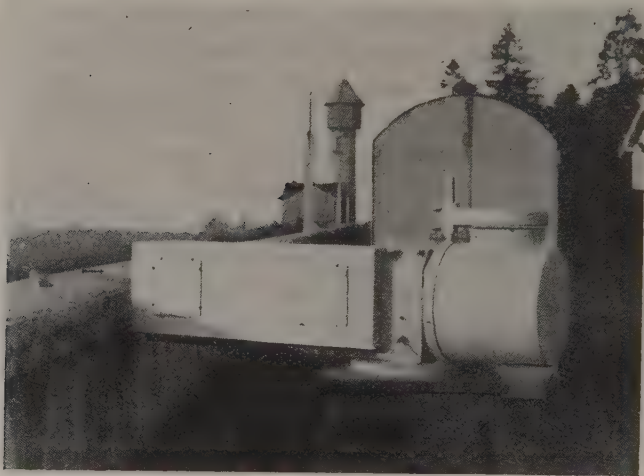


Fig. 3. — Vue générale de l'appareil n° 2 en cours d'installation.

On distingue à gauche la plate-forme allongée recouverte d'un couvercle avec deux portes de visite. Au centre, la tourelle supportant le tout est mobile autour d'un axe vertical. A droite, un capot cylindrique renferme la cellule, le mécanisme des filtres, l'obturateur. Au-dessus de ce capot, l'anneau porte-objectif. La photographie est prise à Saint-Genis-Laval. Au deuxième plan, un abri enfermant l'appareil n° 1.

circulation régulière de filtres colorés devant la cellule pendant la marche ;

inscription du temps sur la bande d'enregistrement.

Deux axes de rotation ont été choisis : un axe vertical autour duquel tourne tout l'appareil et qui donne l'orientation en azimut ; un axe horizontal autour duquel tourne seulement la partie optique et la cellule, qui donne l'orientation en hauteur (fig. 3 et 4).

Une colonne en fonte C servant de pivot vertical supporte tout l'appareil. La graduation en azimut se trouve sur la base de cette colonne.

Une tourelle T ayant la forme d'un prisme à base carrée, alésée à l'intérieur, s'emboîte sur la colonne. Sur une de ses

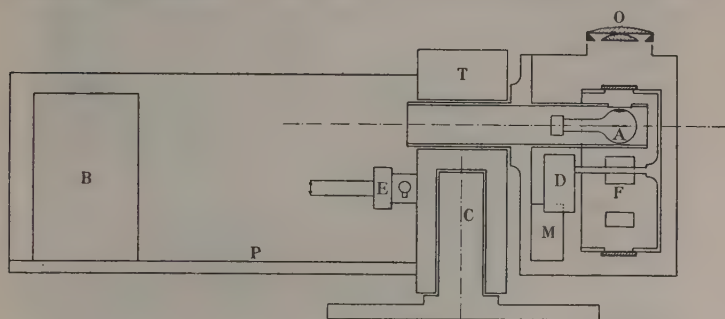


Fig. 4.

faces se trouve fixée une longue plate-forme horizontale P destinée à recevoir l'électromètre, les piles et le dispositif enregistreur. A la partie supérieure de cette face s'ouvre un deuxième alésage qui traverse horizontalement la tourelle et dans lequel peut tourner un tube.

Le tube est solidaire d'un large plateau circulaire en aluminium supportant le mécanisme moteur. Une tige fixée dans le plateau supporte l'objectif. Le tube contient la cellule A qui reçoit la lumière par l'intermédiaire d'une fenêtre pouvant être obturée par rotation d'un tube obturateur entourant le tube principal.

Des couvercles étanches à la lumière enferment d'une part le plate-forme, d'autre part le mécanisme.

La substitution des filtres devant la cellule est obtenue par le dispositif suivant (fig. 5) : huit filtres sont placés sur huit fenêtres régulièrement percées sur la surface latérale d'un tambour cylindrique en aluminium. Un petit moteur électrique fortement démultiplié fait tourner le tambour d'un mou-

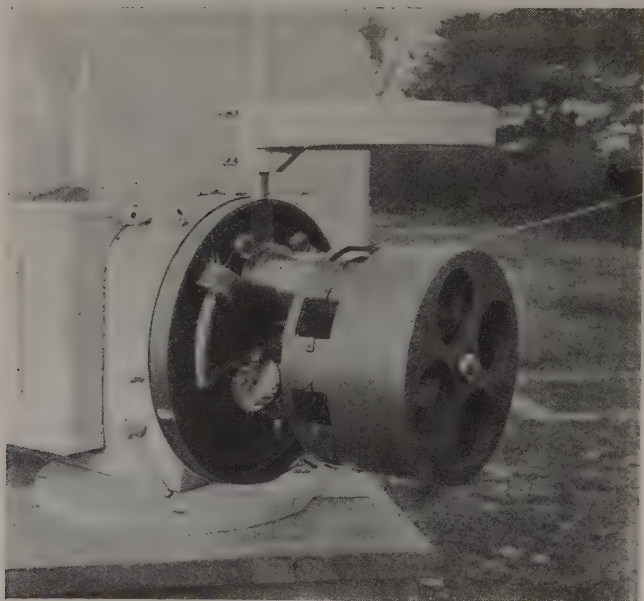


Fig. 5. — Le capot de la figure 3 a été enlevé. On voit de droite à gauche le tambour porte-filtre (les fenêtres sont dégarnies de leurs verres colorés); ensuite le tube obturateur horizontal de grand diamètre s'enfilant sous le tambour; puis l'un des électros de commande de cet obturateur. En dessous, le variateur de la vitesse du moteur. Enfin, le plateau circulaire puis les autres organes déjà décrits : tourelle, plate-forme, etc... Au-dessus, l'anneau porteobjectif.

vement discontinu grâce à une croix de Malte à huit branches. Une obturation complète sépare deux filtres consécutifs donnant ainsi le zéro de l'appareil très fréquemment. La

vitesse du moteur est variable dans de très larges limites grâce à un dispositif électrique spécial. En plus, un changement de vitesse est prévu sur la démultiplication, de sorte que la période de succession des filtres peut prendre toutes les valeurs entre 20 secondes et 8 minutes.

Une transmission spéciale met en marche le déroulement

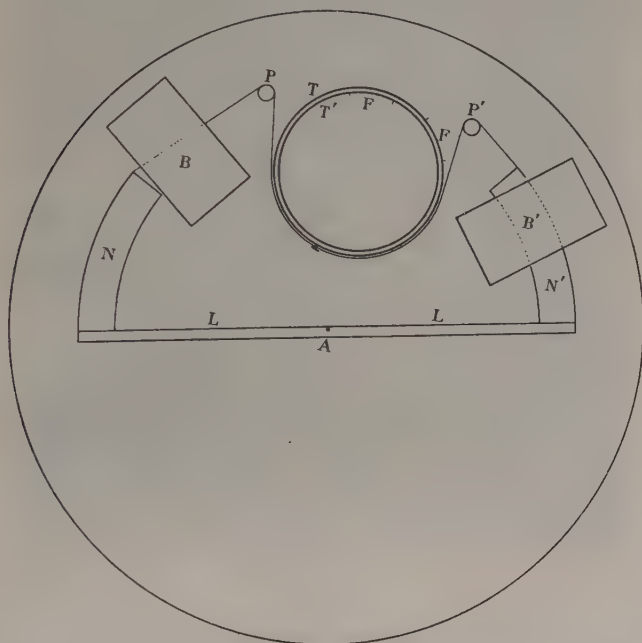


Fig. 6.

du papier photographique enregistreur à partir de ce même moteur en donnant un déroulement d'environ 6 mm par filtre passant devant la cellule.

La rotation de l'obturateur autour du tube principal, destinée à ouvrir ou fermer la fenêtre de la cellule, est commandée par deux électro-aimants représentés figure 6 et dont une partie est visible figure 5.



Fig. 7.

On voit à la partie inférieure le cadran du mouvement d'horlogerie en haut duquel une came spéciale a été rapportée pour commander les extinctions tous les quarts d'heure.

Au-dessus, les bornes d'arrivée des différents circuits, deux tubes à mercure et un support pour un troisième. Ces tubes sont normalement placés sous couvercle.

Au fond de la boîte et plus haut, on distingue dans l'ombre les boîtes de jonction des différents circuits disposées verticalement.

Tout à fait à gauche, le grand plateau circulaire avec le bouton du changement de vitesse, et les engrenages renvoyant le mouvement du moteur au dérouleur de papier photographique (fig. 8).

Tout à fait à droite, le début de la plate-forme recouverte de son couvercle.

L'organe de commande automatique doit alors remplir le rôle suivant :

Ouverture. — A une heure déterminée, envoyer pendant une seconde environ le courant continu dans l'électro-aimant d'ouverture; couper ce courant; en même temps, établir le contact sur un circuit alternatif mettant en marche le moteur des filtres et de l'enregistreur et allumant la lampe d'éclairage de l'électromètre.



Fig. 8.

Le grand couvercle de la plate-forme a été enlevé et on ne voit ici que l'extrémité de cette plate-forme.

La réserve de papier photographique est dans la boîte carrée en haut.

On distingue le mécanisme d'entraînement, mu par le renvoi à cardan.

La partie inférieure est représentée ouverte et laisse entrevoir la bobine réceptrice.

En marche. — Eteindre périodiquement pendant 20 secondes la lampe d'éclairage de l'électromètre tous les quarts d'heure; une double extinction est prévue aux heures justes (une extinction partielle est réellement réalisée pour prolonger la durée de la lampe).

Fermeture. — A une deuxième heure déterminée, envoyer pendant une seconde environ un courant continu dans l'électro-aimant de fermeture ; couper ce courant ; couper également l'alternatif.

Un seul mouvement d'horlogerie remplit ces diverses tâches. Il est situé sur une des faces libres de la tourelle centrale. Tous les contacts sont obtenus au moyen de tubes à mercure (fig. 7).

L'enregistreur (fig. 8) est un appareil déroulant d'une façon continue une bande de papier photographique perforé à émulsion spéciale. A la partie supérieure se trouve une réserve de 100 m. La bande se déroule verticalement et passe derrière une fente où elle est impressionnée. Elle vient ensuite s'enrouler sur une bobine réceptrice que l'on peut enlever en plein jour pour la transporter au laboratoire de développement. Le papier a une largeur totale de 60 mm dont 49 sont situés entre les perforations. Un viseur spécial permet de suivre les déplacements de l'aiguille de l'électromètre sans interrompre l'enregistrement.

L'objectif est constitué par deux lentilles plan-convexes de distance focale 400 et 330 mm séparées par une distance de 40 mm. Il a une distance focale de 190 mm pour les rayons centraux jaunes. Il n'est ni stigmatique ni achromatique, mais comme on n'a pas besoin de délimiter strictement sur le ciel une région à bords nets, il n'a pas besoin de plus grands perfectionnements. Le diamètre de la première lentille est 228 mm dont 218 sont utilisés, ce qui correspond à une ouverture relative de $f/0,87$.

Une série de diaphragmes à placer à 5 mm sous la deuxième lentille permet de réduire l'ouverture pour l'étude du crépuscule et pour l'étalonnage de nuit au moyen d'une lampe éloignée.

Un dispositif d'étalonnage en plein jour peut se mettre à la place des lentilles. Il est dérivé du système I décrit à « Sources lumineuses de comparaison ».

Les filtres. — A part quelques enregistrements effectués tout au début de ce travail aucune mesure n'a été faite en lumière totale. Des filtres colorés ont été interposés entre la cellule d'une part et le ciel ou l'étalon d'autre part. Ces filtres ont été choisis dans la collection suivante :

Filtres	Epaisseur	Limites extrêmes	Maximum	Limites pratiques
Bleu				
BG4 (Schott) .	1 mm.	3 400-5 000 Å	0,80 à 4 200 Å	3 600-4 600
	2 mm.		0,63	
Vert				
BG2	8 mm.	5 200-5 750	0,35 5 475	5 320-5 670
VG1	1 mm.			
OG1	1 mm.			
Rouges				
OG2	4 mm.	5 800	0,92 6 200	5 850
RG1	2 mm.	6 250	0,92 6 600	6 400
RG5	2 mm.	6 500	0,92 7 300	6 800
RG8	2 mm.	7 000	0,90 7 600	7 250
88 Wratten . . .		7 100	0,84 7 750	7 350
Manganal	2 mm.	8 000-9 000	0,03 (moyenne)	
»	»	9 000-10 000	0,20 (moyenne)	

Ces valeurs sont déduites de mesures spectrophotométriques effectuées sur les filtres eux-mêmes, soit par photographie, soit au moyen de la cellule photoélectrique au rubidium montée sur l'appareil n° 3.

Le spectrographe employé a été dans les deux cas le même spectrographe à réseau donnant une dispersion d'environ 30 Å par millimètre.

Les autres appareils. — L'enregistreur n° 1 (6) diffère du numéro 2 par la réalisation. Il a subi de nombreuses modifications (7) (8) (9) Sa dernière forme est la suivante (fig. 9) : la cellule est une cellule C à alliage de césium. Elle est fixe et ne peut viser que les régions zénithales, l'appareil n'est orientable en aucune façon. Trois filtres F seulement sont utilisables

simultanément, ils sont situés sur un disque horizontal mû par un moteur et une croix de Malte.

L'électromètre W est un Wulf monofilaire (excellent instrument pouvant être monté aussi sur le numéro 2). L'enregistreur est un simple cylindre garni de papier photographique avec mouvement d'horlogerie autonome; diamètre 10 cm, longueur 15 cm, un tour en 12 heures. La longueur de papier utilisable est limitée à 30 cm.

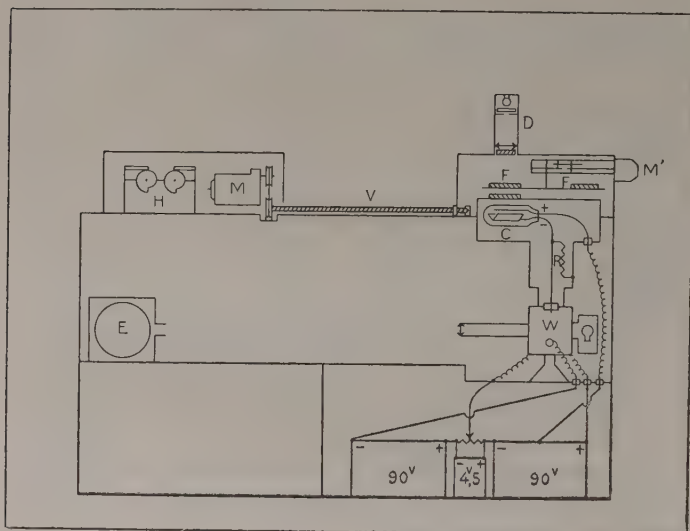


Fig. 9. — Schéma de l'appareil n° 1.

C, Cellule photoélectrique à alliage de césium ; R, Résistance de $1,4 \times 10^{11}$ ohms ; W, Electromètre Wulf ; F-F, Filtres colorés sur le plateau tournant ; M, Moteur actionnant l'obturateur par l'intermédiaire de la vis V ; M', Moteur actionnant le plateau porte-filtres ; H, Mouvement d'horlogerie commandant l'ouverture, la fermeture de l'obturateur et l'extinction de la lampe de l'électromètre ; E, Cylindre enregistreur ; D, Dispositif d'éta-

lonnage.
L'appareil est représenté fermé. Les piles sont dans un compartiment spécial à la partie inférieure. On n'a pas figuré le dispositif de compensation du courant d'obscurité de la cellule au césium.

L'ouverture et la fermeture sont automatiques ; l'obturateur a la forme d'une boîte parallélépipédique. Il est animé d'un mouvement de translation par un moteur et une vis attaquant un écrou solidaire de l'obturateur (fig. 10). Un

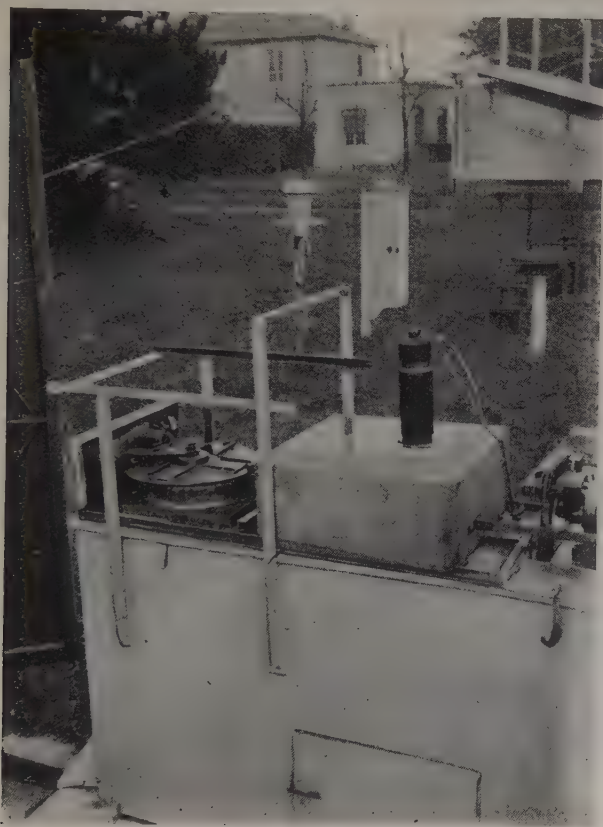


Fig. 10. — Vue partielle de l'enregistreur n° 1 ouvert. On distingue le plateau porte-filtres et l'obturateur surmonté du dispositif d'étalonnage. Tout à fait à droite, on voit la moitié du moteur M. Au-dessus du plateau porte-filtres, des barres destinées à supporter un objectif de grandes dimensions. En bas, une des portes permettant d'accéder au compartiment des piles. En arrière-plan, des appareils météorologiques de l'Observatoire de Lyon.

mouvement d'horlogerie commande l'ouverture et la fermeture, interrompt le courant de la lampe d'éclairage toutes les heures, met en marche et arrête les filtres.

Sur l'obturateur est fixé le dispositif d'étalonnage en plein jour constitué par une petite lampe, un trou de 1 mm,

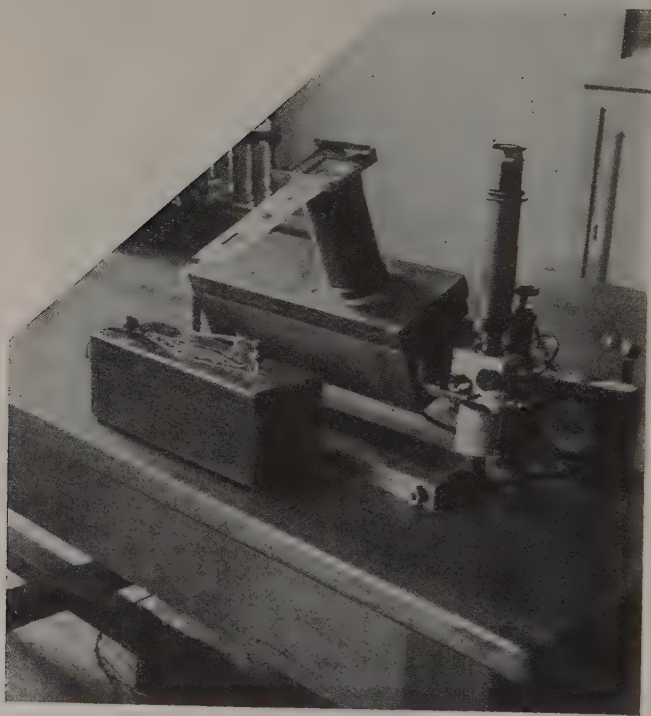


Fig. 11. — Vue d'appareil n° 3.

- A gauche, la boîte contenant la cellule ; la résistance, surmontée d'un tube contenant un objectif devant lequel on peut déplacer des diaphragmes.
 - A droite, l'électromètre de Lindemann et le microscope.
- La pile Wonder de 45 volts, qui suffit à l'alimentation de l'appareil, permet de juger les dimensions restreintes de ce photomètre.

une lentille et un verre absorbant (Voir « système I » au chapitre suivant).

L'appareil n° 3. — Cet appareil (représenté fig. 11) est un photomètre à lecture directe. Equipé avec une cellule au rubidium et un électromètre Lindemann, il est très léger (moins de 3 kg) et peu encombrant (dimension maximum 45 cm). La cellule est orientable en hauteur, car la boîte dans laquelle elle est enfermée est mobile autour d'un axe horizontal. Il a été utilisé pour quelques mesures complémentaires sur le crépuscule, pour étudier la transparence spectrale des filtres colorés (associé avec un spectroscopie à réseau) et pour étudier l'éclipse de lune du 7 novembre 1938 associé avec l'équatorial coudé de l'Observatoire de Lyon.

Les sources lumineuses de comparaison. — Les photomètres ne peuvent servir qu'à comparer la lumière du ciel avec une autre lumière bien déterminée prise pour étalon.

En réalité trois sortes d'étalons ont été utilisés :

Le *système I* ou *étalon I* est un dispositif d'étalonnage en plein jour ; il comprend successivement (D, fig. 9) :

Une lampe faible à filament de tungstène placée comme branche d'un pont de Wheatstone dont les trois autres branches sont des résistances de constantan. Le galvanomètre du pont est amené au zéro en manœuvrant un double rhéostat (réglage grossier et réglage fin) placé entre la batterie d'accumulateurs et le pont. La lampe fonctionne ainsi à résistance constante (10).

Un verre opale diffusant est placé à quelques millimètres de l'ampoule contre un diaphragme percé d'un trou de 1 mm de diamètre.

A 10 cm. de ce diaphragme, une lentille convergente de 10 cm. de distance focale transforme le faisceau en lumière parallèle.

Un verre absorbant est ensuite placé sur ce faisceau. C'est un verre NG3b de Schott de densité optique voisine de 3. La

« neutralité » de ce verre n'a pu être étudiée directement. On s'est contenté d'étudier (comme on l'a fait pour les filtres colorés) un morceau de verre NG3b de 1/2 mm d'épaisseur acheté en même temps. La transmission n'est pas indépendante de la longueur d'onde mais garde une valeur suffisamment constante pour être qualifiée de satisfaisante. Il est cependant impossible de connaître rigoureusement la composition spectrale du rayonnement qui sort de ce verre.

Le faisceau parallèle sorti du verre absorbant traverse alors les filtres avant d'arriver sur la cellule.

Lampe B. — N'est autre que la lampe faible ci-dessus fonctionnant dans les mêmes conditions électriques mais éloignée de 46,9 m. On l'utilise la nuit et on compare les déviations de l'électromètre lorsque la cellule reçoit le rayonnement du système I et celui de la lampe B à travers les divers filtres.

La composition spectrale de son rayonnement a été déterminée, d'après les données de Ribaud (11), après avoir mesuré sa température (2 100° K) au pyromètre à disparition de filament. Mais il reste à connaître son intensité.

Lampe C. — Est une lampe à filament de carbone à température 2013° K valant exactement une bougie. On a comparé les lampes B et C pour avoir la valeur de B et on a trouvé :

$$\text{Lampe B} = 1,15 \text{ bougie.}$$

CHAPITRE III

Couleur du ciel nocturne.

Jusqu'en 1929 la couleur du ciel nocturne était considérée comme moins bleue que celle du ciel diurne, mais de composition analogue à celle de la lumière solaire. Depuis lors, la partie rouge du spectre a été de mieux en mieux étudiée. Dufay (12), au cours d'une longue série de recherches photométriques très précises, trouva la lumière du ciel nocturne plus rouge que celle du ciel lunaire. Cabannes (13) fit remarquer que le ciel nocturne, trop rouge pour une diffusion de la lumière du soleil ou des étoiles par les molécules d'un gaz raréfié, n'était pas assez polarisé pour une diffusion de la lumière par des électrons libres et il montra que des radiations d'origine atmosphérique, très intenses dans le rouge et le début de l'infra-rouge, venaient s'ajouter à la diffusion interplanétaire ou interstellaire. En 1937 (14) j'ai signalé les premiers résultats mettant en évidence l'énorme importance des grandes longueurs d'onde.

Technique. — Cette étude colorimétrique a été faite par comparaison du ciel avec un filament de tungstène à température de 2 100° K à travers divers filtres.

Les régions spectrales employées ont été :

Bleu	BG4, 1 mm d'épaisseur . .	$\lambda\lambda$ 3 500-5 000
Vert	BG2, 8 mm d'épaisseur . .	5 300-5 650
	VG » » . .	
	OG1 » » . .	
Rouge	OG2 4 mm d'épaisseur . .	5 850-9 000
	RG5 2 » » . .	6 800-9 000
	RG8 2 » » . .	7 250-9 000

A travers chacun des filtres la lumière du ciel a été comparée à celle de la lampe B placée à 46,9 m.

Le photomètre a été employé sans objectif et par suite les résultats correspondent à un grand angle solide.

Les calculs suivants sont faits sur les moyennes de plusieurs mois. Les résultats dépendent en partie des époques où ont été faites les observations. Aussi ai-je pris, autant que possible, un intervalle d'un an, supposant une période d'un an aux variations de la couleur du ciel nocturne.

Résultats. — *Importance du rouge.* — Déterminons d'abord la moyenne des déviations du photomètre lorsque la cellule est exposée à la lumière du ciel et à l'étalon I. On en déduit le rapport des déviations correspondant au ciel et à la lampe B. Connaissant l'énergie rayonnée par le tungstène à 2 100° K dans les différents domaines spectraux (11) nous obtenons l'énergie rayonnée par le ciel nocturne dans les mêmes domaines.

L'énergie rayonnée dans le bleu (entre 3 500 et 5 000 Å) étant prise comme unité, la moyenne des lectures faites du milieu de 1937 au milieu de 1938 donne 230 pour l'énergie rayonnée entre 5 850 et 9 000 Å.

L'énergie rayonnée dans le rouge est donc considérable vis-à-vis de celle qui est rayonnée dans le bleu.

Répartition dans le rouge. — Ayant alors fractionné l'étude du rouge au moyen des filtres RG5 et RG8 associés avec OG2, j'ai calculé par différence les énergies correspondant aux bandes 5 850-6 800 Å et 6 800-7 250 Å tandis que le filtre RG8 donnait la bande 7 250-9 000 Å.

En divisant les énergies obtenues ainsi par la largeur spectrale des intervalles successifs, on obtient, en unités arbitraires, des nombres qui peuvent être considérés comme les brillances spectrales énergétiques moyennes des intervalles considérés.

On trouve ainsi :

Limites	Energie	Brillance moyenne
5 850-6 800 Å	4,9	5,2
6 800-7 250 Å	1,6	3,6
7 250-9 000 Å	20	11,4

D'autre part dans des mesures séparées j'avais obtenu des renseignements sur le bleu et le vert. Pour les ramener à la même unité que les nombres ci-dessus, j'admets que le rayonnement est resté en moyenne le même à travers le filtre OG₂ commun à toutes ces mesures. On peut ainsi calculer :

Limites	Energie	Brillance moyenne
3 500-5 000 Å	0,15	0,10
5 300-5 650 Å	0,3	0,85

ce qui conduit au graphique ci-dessous (fig. 12).

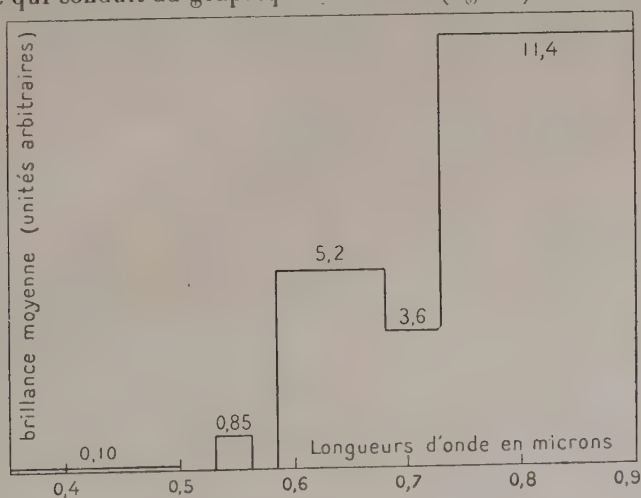


Fig. 12.

Interprétation. — L'extrême importance du rouge et du proche infra-rouge est évidente.

On remarquera la bande plus faible entre 6 800 et 7 250 Å, alors que la région 5 860-6 800 Å est plus intense. On sait d'après des observations spectroscopiques (13) (15) (16) (17) (1) que la raie 6 300 Å est particulièrement intense et qu'il existe des bandes également très intenses vers 6 500 Å. De même la photographie a montré un rayonnement intense vers 7 600 Å et plus loin. Au contraire l'intervalle 6 800-7 250 Å n'est pas particulièrement riche en raies ou bandes intenses.

Il peut être intéressant de rechercher quelle est la température du corps noir qui donnerait une répartition spectrale énergétique se rapprochant de celle que je viens de citer.

J'ai fait le calcul de deux façons en me servant des tables données par Ch. Fabry (18).

Premier calcul : on cherche pour quelle température les radiances spectrales du corps noir sont à peu près dans le même rapport que les brillances moyennes du ciel pour les mêmes longueurs d'onde moyennes des intervalles ci-dessus considérés. En prenant comme unités les valeurs dans le bleu, à 2 050° K, on trouve une concordance suffisante :

Longueur d'onde moyenne	Corps noir à 2 050° K	Ciel
4 200 Å	1	1
5 500 Å	13	8,5
6 500 Å	41	44
8 000 Å	108	114

Deuxième calcul : on cherche à quelle température l'énergie émise par le corps noir dans le rouge entre 5 850 et 9 000 Å est 230 fois environ celle qu'il émet entre 3 500 et 5 000 Å (dans le bleu).

La température de 1 800° K donne ce rapport.

Parmi les divers auteurs (19) (20) (12) ayant étudié la couleur du ciel nocturne, seul Lord Rayleigh dans certaines de ses mesures visuelles avait trouvé un résultat s'écartant d'une façon notable de la couleur du soleil. Il avait donné la couleur de la lampe demi-watt comme se rapprochant de celle du ciel.

On voit que la couleur est encore plus rouge et, en particulier lorsqu'on veut exprimer la brillance du ciel nocturne, il n'est pas souhaitable de le comparer avec les étoiles dont la couleur diffère énormément de la sienne. Il est préférable de comparer le ciel nocturne avec une source dont la répartition spectrale des énergies se rapproche de la sienne. Les lampes à incandescence à basse température employées en photométrie sont tout indiquées (voir chapitre V).

CHAPITRE IV

Variations annuelles de la brillance.

Technique. — Au voisinage de la nouvelle lune, lorsque le ciel était complètement dégagé, on réglait le mouvement d'horlogerie pour avoir l'enregistrement d'un ciel sans lune et sans crépuscule astronomique.

Au moyen du dispositif d'étalonnage en plein jour ⁽¹⁾ on faisait un étalonnage; le plus souvent par lecture directe, quelquefois par enregistrement photographique. Dans cette opération on mesurait les déviations prises par l'électromètre lorsque la cellule était exposée au rayonnement du système d'étalonnage n° 1 passant à travers les différents filtres utilisés pour la nuit prochaine.

Le lendemain cet étalonnage était répété.

On prenait comme étalon la moyenne des indications dans les rares cas où une petite divergence se manifestait. Cette moyenne est dénommée étalon I dans les résultats.

Le photomètre était employé sans objectif c'est-à-dire pour un angle solide grand.

Après enregistrement et développement on avait, sur le papier photographique, les déviations de l'électromètre lorsque la cellule était exposée au ciel nocturne avec interposition des divers filtres. Le zéro était repris périodiquement.

⁽¹⁾ Pour s'assurer de la fixité de la lampe utilisée, tous les 6 mois ou tous les ans on a refait la mesure de sa température. Sur un intervalle total de près de 3 ans aucune variation notable n'a été constatée.

La mesure des ordonnées ne présente aucune difficulté et le rapport entre ces ordonnées et celles de l'étalon I sert à former le rapport Ciel-Étalon I.

Ce rapport subit des variations au cours de chaque nuit (voir : Variations diurnes) qui sont faibles. On cherche la moyenne de ce rapport au cours de chaque nuit et pour chaque filtre. Cette moyenne servira à placer un point sur le graphique des variations annuelles.

Discussion. — Fidélité : l'appareil étant équipé avec une cellule à vide, le courant photoélectrique est rigoureusement proportionnel au flux lumineux reçu. L'électromètre fonctionnant sous un dixième de volt environ, a, lui aussi, une elongation proportionnelle à la différence de potentiel. On peut donc admettre sans difficulté que la déviation du photomètre est proportionnelle au flux lumineux reçu par la cellule. On a donc bien le rapport des flux en faisant le rapport des déviations. Ceci est d'autant mieux réalisé que le rayonnement de l'étalon est plus voisin de celui du ciel nocturne; ce qui est bien le cas dans nos mesures.

Influence des étoiles. — Le flux lumineux reçu est dû à la fois aux étoiles et au fond du ciel. Ce dernier seul nous intéresse. Il a été démontré que l'ensemble des étoiles ne faisait qu'une faible partie de la lumière nocturne. Et dans mes mesures l'angle solide étant grand, il a été inutile de déduire la lumière des étoiles pour obtenir la variation de la lumière du fond du ciel. Il est d'ailleurs à remarquer que mes meilleures mesures portent sur la région spectrale 5800-9000 Å et non sur la région bleue. Les étoiles ont des températures de couleur élevées en général et les perturbations apportées dans le rouge doivent être encore moins considérables que dans les régions visibles précédemment envisagées par les observateurs (21). J. Dufay et Wang Shih Ky ont donné comme évaluation de la lumière de toutes les étoiles un tiers de la lumière nocturne totale. Or comme je le démontrerai au chapitre V les mesures sont faites en lumière

bleu-vert. Comme le ciel nocturne donne une lumière rouge considérable (voir : chapitre Couleur) et comme les évaluations des précédents auteurs quant à la lumière nocturne totale excluaient justement cette région rouge le rapport réel à admettre pour la participation des étoiles à mes observations est bien plus faible qu'un tiers. J'admets qu'il n'y a pas lieu de se préoccuper des étoiles lorsqu'on étudie le rouge.

Variations annuelles de la lumière globale. — Résultats. — Le graphique de la figure 13 résume les variations obtenues

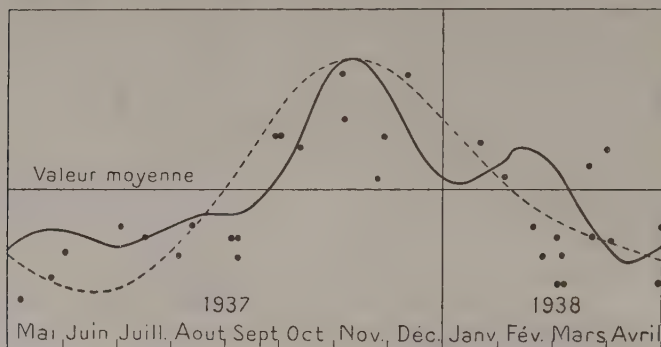


Fig. 13. — Variations annuelles. Comparaison des valeurs expérimentales avec les formules.

● Valeurs expérimentales.

— Formule à 4 termes de l'auteur.

--- Formule à 2 termes de Rayleigh.

On a choisi les 12 mois compris de mai 1937 à mai 1938 à cause de la densité exceptionnelle des points expérimentaux. Les observations avant et après étant beaucoup plus espacées sont de moindre intérêt.

à travers le filtre OG₂ (région 5 800-9 000 Å) avec l'enregistreur n° 1. Il correspond au tableau suivant (21) :

Dates	Rapport Ciel Etalon I	Dates	Rapport Ciel Etalon I
1937 11 janv. . .	1,9	1938 5 mars. . .	1,6
12 janv. . .	1,2	6 mars. . .	1,4
7 mai. . .	1,2	20 mars. . .	2,2
2 juin. . .	1,6	22 mars. . .	1,7
3 juil. . .	1,8	31 mars. . .	2,3
14 juil. . .	1,7	2 avril. . .	1,7
5 août. . .	1,6	29 avril. . .	1,4
11 août. . .	1,8	2 mai. . .	1,8
2 sept. . .	1,7	20 juin. . .	2,0
7 sept. . .	1,7	24 juin. . .	1,4
8 sept. . .	1,6	26 juin. . .	1,7
30 sept. . .	2,4	21 juil. . .	1,2
1 oct. . .	2,4	22 juil. . .	1,3
13 oct. . .	2,3	23 août. . .	2,0
5 nov. . .	2,8	1 sept. . .	1,5
6 nov. . .	2,5	23 sept. . .	1,4
26 nov. . .	2,1	20 oct. . .	1,4
28 nov. . .	2,4	22 nov. . .	1,1
10 déc. . .	2,8	1939 15 févr. . .	1,0
1938 20 janv. . .	2,4	16 févr. . .	1,0
5 févr. . .	2,1	19 avril. . .	1,3
21 fév. . .	1,8	20 avril. . .	1,2
25 févr. . .	1,6	21 avril. . .	1,0
3 mars. . .	1,7	14 juin. . .	1,6
4 mars. . .	1,4	17 juin. . .	1,5

Interprétation. — Après dix années de travail Lord Rayleigh et Spencer Jones (23) ont donné une formule pour représenter les variations annuelles, dans laquelle ils ont supposé deux périodes : une de 1 an, l'autre de 6 mois. Dans le rouge ils donnent comme brillance :

$$b = 1,15 \sin(\theta + 127^\circ) + 0,31 \sin(2\theta + 212^\circ).$$

J'ai développé en série de Fourier l'intervalle où j'avais les mesures les plus serrées (mai 1937, septembre 1938). J'ai calculé les termes jusqu'au quatrième ordre et j'ai trouvé avec des unités arbitraires :

$$b = 79 \sin(\theta + 122^\circ) + 21 \sin(2\theta + 180^\circ) \\ + 29 \sin(3\theta - 90^\circ) + 27 \sin(4\theta - 90^\circ).$$

Ramenée aux mêmes unités que les miennes la formule de Lord Rayleigh et Spencer Jones devient :

$$b = 79 \sin(\theta + 127^\circ) + 21,3 \sin(2\theta + 21^\circ).$$

Il est remarquable de trouver une concordance aussi complète tant pour les amplitudes que pour les phases. L'accord est donc très satisfaisant entre les deux formules. Mais on peut constater que les troisième et quatrième termes ont des amplitudes dépassant celle du deuxième. La convergence de la série est loin d'être assez rapide pour qu'on puisse négliger les termes supérieurs à deux. Des observations plus prolongées diront à quel terme il convient d'arrêter la série de Fourier.

Remarque sur les variations « séculaires ». — Lord Rayleigh a envisagé, en plus des variations diurnes et annuelles, des variations « séculaires » dont la période (si elle existe) serait supérieure à un an.

Mes observations ont permis de voir très nettement leur existence et même de formuler une remarque à leur égard. (Il ne peut évidemment pas être question d'énoncer une loi pour ces variations).

On remarque sans difficulté que toutes les valeurs de l'intervalle août 1937-août 1938 sont nettement supérieures à celles de l'année suivante août 1938-août 1939. Cette diminution est attribuable aux variations « séculaires ». Mais on peut voir aussi que cette diminution semble s'être manifestée très brusquement en octobre 1938. On peut alors se demander si les variations séculaires ne seraient pas soumises à des irrégularités brusques analogues à celles qu'on connaît depuis longtemps d'un jour à l'autre au cours de l'année.

Variations annuelles de la couleur. — Nous avons vu que les radiations rouges 5 850-9 000 Å limitées par le filtre OG2

transportent la plus grande partie de l'énergie émise par le ciel.

Pour étudier les variations de couleur je prends comme unité la déviation de mon photomètre obtenue avec le filtre OG₂ et j'évalue les intensités relatives des autres parties du spectre en fonction de cette unité. Les variations globales d'intensité sont ainsi éliminées des résultats.

Région 5 850-6 800 Å. — La brillance de cette région est calculée par différence entre les indications des filtres OG₂ et RG5. Au cours des années 1937 et 1938 le filtre OG₂ a toujours été utilisé tandis que le filtre RG5 n'a pas été tou-

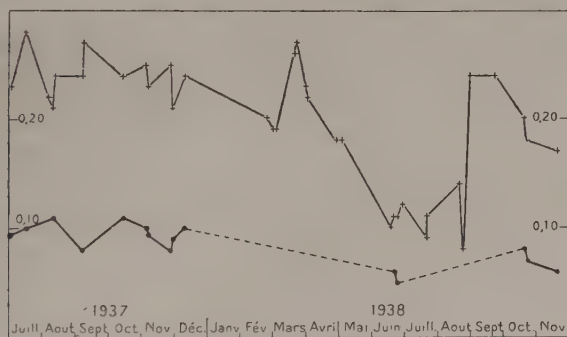


Fig. 14.

+ Rapport $\frac{\text{Rouge proche}}{\text{Rouge total}}$
 ● Rapport $\frac{\text{Bleu}}{\text{Rouge total}}$

On ne remarque pas de périodicité évidente mais seulement une diminution pendant l'été 1938.

jours employé. Voici exactement les dates et les filtres employés :

Août 1937 à février 1938 . . .	OG ₂	RG5	BG4
Février 1938 à juin 1938 . . .	OG ₂	RG5	RG8
Jun 1938 à décembre 1938 . . .	OG ₂	RG8	BG4

On a constaté lors de l'emploi simultané des filtres RG5 et RG8 que leurs indications étaient pratiquement identiques,

ce qui a fait abandonner RG5 vers la fin des mesures. Cette constatation est en accord avec la répartition spectrale donnée au chapitre II.

Région 3 500-5 000 Å. — Étudiée par intermittences, elle est signalée dans le tableau suivant (24) et les points correspondants ont été portés sur le graphique 14.

Dates		OG3-OG8 OG2	OG3-RG5 OG2	BG4 OG2
1937	3 juil.		0,23	0,095
	14		0,28	0,10
	5 août		0,32	
	10 »		0,31	0,11
	11 »		0,24	
	7 sept.		0,24	0,08
	8 »		0,37	
	13 oct.		0,24	0,11
	5 nov.		0,25	0,10
	6 »		0,23	0,095
	20 »		0,25	0,08
	28 »		0,21	0,09
	10 déc.		0,24	0,10
1938	25 févr.	0,20	0,20	
	2 mars	0,19	0,19	
	4 »	0,19	0,19	
	20 »	0,26		
	21 »	0,27		
	31 »	0,23		
	2 avril	0,12	0,12	
	20 »	0,18	0,18	
	2 mai	0,18	0,18	
	17 juin	0,10	0,10	
	20 »	0,11	0,11	
	24 »	0,11		
	26 »	0,12		
	21 juil.	0,09		0,06
	22 »	0,11		0,05
	22 août	0,14		
	23 »	0,08		
	1 sept.	0,24		
	23 »	0,24		
	20 oct.	0,20		0,08
	22 »	0,18		0,07
	22 nov.	0,17		0,06

Les variations observées sur la région 5 850-6 800 Å paraissent en accord avec les observations très discontinues de

Garrigue faites au Pic du Midi sur la raie 6300 (25); il trouve en effet une intensité plus grande en hiver.

On est donc conduit à penser que cette raie joue un rôle considérable dans cette région de l'émission du ciel nocturne.

Les quelques observations de la région bleue donnent une idée de la variation de l'indice de couleur du ciel. Le graphique tracé joint aux variations annuelles de brillance ne semble pas confirmer d'une façon nette les remarques de J. Rudnick (26) selon lesquelles le bleu et le rouge auraient parfois des variations de sens contraire.

Variations diurnes. — Les variations de la raie verte ont été bien étudiées par Mc Lennan et ses collaborateurs (27); Lord Rayleigh (28); H. Garrigue (29).

Mes observations permettent d'atteindre plutôt la région rouge.

L'enregistreur est très bien adapté à l'étude des variations diurnes.

Au début la période de rotation de chaque filtre était d'une heure; on avait donc un point pour chaque filtre chaque heure. Par la suite cette période a été réduite et on a eu plus de trois points par heure pour chaque filtre.

Les indications lues sur les enregistrements ont été reportées sous forme de courbes. Environ 50 courbes ont été tracées en 1937 et 1938.

Toutes ces courbes correspondent à des lumières filtrées et en particulier le filtre OG2 a toujours été employé. Son indication peut être considérée comme la lumière globale du ciel nocturne d'après ce qui a été vu au chapitre II. Les autres filtres employés n'ont pas donné lieu à des remarques spéciales; le filtre à raie verte n'a pas donné d'indications intéressantes.

Aucune forme véritablement typique n'a pu être établie. On peut cependant noter les caractères communs suivants :

Forme primitive. — Les courbes sont presque plates avec une très légère concavité tournée vers le haut; donc tendance très nette à un minimum vers le milieu de la nuit (mais non à heure fixe). La différence entre la moyenne et les valeurs extrêmes d'une même nuit atteint rarement 10 o/o de cette moyenne.

Déformations. — A partir de ce schéma simple on constate :

— des accidents locaux durant une demi-heure ou une heure et donnant à certaines courbes une forme ondulée. L'amplitude de ces oscillations est faible;

— des variations lentes, probablement liées à la variation annuelle qui donne à certaines courbes la forme montante alors que d'autres ont une forme plus nettement descendante.

Ces deux genres de déformations expliquent qu'on puisse

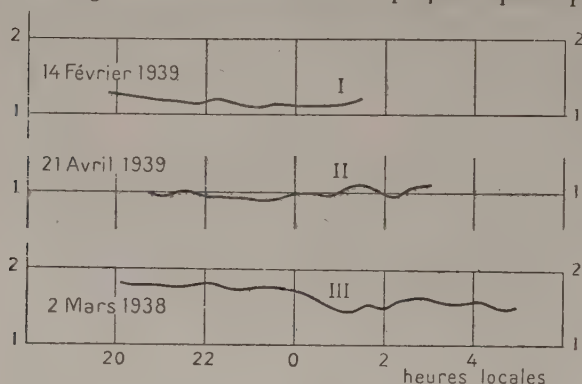


Fig. 15. — Formes de courbes de variations diurnes.

I Forme « primitive » ondulée.

II Forme ascendante.

III Forme descendante.

Les ordonnées sont les rapports Ciel/Etalon I.

Les abscisses sont les heures locales.

trouver des maximums sur certaines courbes et que d'autre part on ne puisse trouver le minimum de la forme primitive exactement à la même heure lorsqu'il se manifeste d'une façon nette (fig. 15)

CHAPITRE V

Brillance.

Malgré de nombreuses déterminations antérieures résumées par J. Dufay (1) les mesures actuelles conduisent à une sérieuse modification des nombres admis auparavant.

Principe. — La lumière qui traverse le filtre OG₂ étant considérée comme lumière globale du ciel nocturne, on compare les éclairéments envoyés par le ciel et par la lampe B au moyen du photomètre enregistreur.

La lampe B est elle-même comparée avec la lampe C, véritable étalon photométrique, en laboratoire.

L'angle solide utile sur le ciel est ensuite déterminé au moyen de diaphragmes.

On fait alors le calcul en supposant la brillance uniforme sur la portion de ciel employée.

Le résultat exprime la brillance du ciel nocturne en fonction d'une source dont la couleur est voisine de la sienne.

Mesures. — En reprenant les résultats déjà acquis au chapitre Variations annuelles, les moyennes des rapports Ciel/Etalon I sont en 1937, 2,03 et en 1938, 1,75.

Le système d'étalonnage I a été comparé de nuit avec la lampe B et pour le filtre OG₂ on a trouvé $\text{Lampe B/Etalon I} = 2,37$.

Dans cette opération la lampe B était placée loin de l'enregistreur n° 1 (non orientable) ouvert. Sa lumière était réfléchie par un miroir à 45°. La distance à franchir par la lumière était de 46,9 m pour atteindre la cellule après passage à travers les filtres. On a opéré par différence en mas-

quant et démasquant la lampe éloignée ; ainsi les lumières parasites n'interviennent pas.

L'enregistreur étant ensuite fermé on a procédé à une détermination des indications du système étalon I.

Il en résulte que respectivement pour les années 1937 et 1938 les rapports Ciel/Lampe B sont : 0,855 et 0,737.

Ces rapports représentent le rapport des éclairements produits par le ciel et par la lampe B.

Résultats. — Comme la lampe B a une intensité de 1,15 bougie l'éclairement qu'elle produit à 46,9 m est $6,55 \cdot 10^{-4}$ lux. On peut donc affirmer que l'éclairement produit par le ciel évalué en lux a été en moyenne au cours de 1937, $5,60 \cdot 10^{-4}$ lux et au cours de 1938, $4,82 \cdot 10^{-4}$ lux.

Il ne reste plus qu'à déterminer quelle portion du ciel a produit cet éclaircissement pour connaître la brillance du ciel.

Pour déterminer la surface utile du ciel j'ai cherché l'angle ζ , distance zénithale du cercle limitant la calotte sphérique utile.

Un seul diaphragme a été jugé insuffisant pour acquérir ce résultat pour les raisons suivantes : la surface sensible de la cellule employée était très mal délimitée car c'était une cathode en forme de dièdre ; le verre de l'ampoule étant uniformément transparent il n'existe pas de fenêtre et on ne sait dans quel plan horizontal situer la surface réceptrice équivalente à cet ensemble de deux plans inclinés dont la sensibilité n'est d'ailleurs probablement pas uniformément répartie. Ensuite, aucune précaution n'avait été prise lors de la construction pour diaphragmer le faisceau reçu, par une ouverture connue.

J'ai donc employé successivement deux diaphragmes percés d'ouvertures circulaires ayant respectivement 25 et 50 mm de rayon. Désignons par R et 2R ces rayons.

Par une nuit pure et sans lune on cherche la position à donner à l'un des diaphragmes tenu horizontalement au-dessus de la cellule pour voir la déviation de l'électromètre

diminuer de moitié. On note la position de ce diaphragme par rapport à l'appareil. On fait la même opération en employant le deuxième diaphragme seul. On mesure la distance des positions de ces deux diaphragmes. Soit z cette distance. On a trouvé $z = 9$ cm.

On admet alors que les deux diaphragmes limitent le même angle solide et par conséquent celui-ci est facile à déterminer comme s'appuyant sur les contours des deux diaphragmes. D'autre part cet angle solide contient la moitié du flux utile envoyé par le ciel à la cellule. On peut donc calculer l'angle solide utile en supposant la brillance du ciel uniforme. Comme cet angle solide ne comprend pas de régions s'approchant de l'horizon cette hypothèse est admissible.

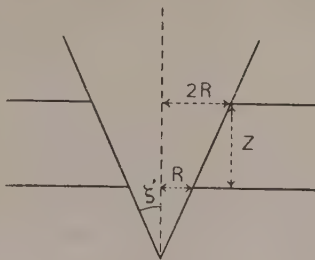


Fig. 16.

Le flux en lumen envoyé sur une surface horizontale de 1 cm^2 (éclairage en phot) par une calotte sphérique de brillance uniforme B centrée sur le zénith limitée au cercle de distance zénithale ζ a pour expression (voir Calcul préliminaire) :

$$E = \frac{\pi}{2} B(1 - \cos 2\zeta).$$

Dans l'expérience ci-dessus on a utilisé l'éclairement E' , moitié de celui-ci correspondant à une distance zénithale ζ' donnée par :

$$E' = \frac{E}{2} = \frac{\pi}{2} B(1 - \cos 2\zeta').$$

Or ζ' est accessible à la mesure, on a :

$$\operatorname{tg} \zeta' = \frac{R}{z}.$$

Cherchons ζ :

$$2 = \frac{E}{E'} = \frac{1 - \cos 2\zeta}{1 - \cos 2\zeta'}.$$

Mais :

$$\cos 2\zeta' = \frac{z^2 - R^2}{z^2 + R^2}$$

$$1 - \cos 2\zeta' = \frac{2R^2}{z^2 + R^2}$$

$$1 - \cos 2\zeta = 2(1 - \cos 2\zeta') = \frac{4R^2}{z^2 + R^2}$$

$$E = 2\pi B \frac{R^2}{z^2 + R^2}$$

$$B = \frac{E}{2\pi} \frac{z^2 + R^2}{R^2} = \frac{E}{2\pi} \left(1 + \frac{z^2}{R^2} \right).$$

En remplaçant pour les années citées E par 5,60 ou $4,82 \cdot 10^{-8}$ phot et en prenant $z = 9$ pour $R = 2,5$, on obtient :

En 1937 . . . $B = 12,4 \cdot 10^{-8}$ bougies par centimètre carré

En 1938 . . . $B = 10,7 \cdot 10^{-8}$ bougies par centimètre carré

Il convient de transformer, selon l'habitude, ces résultats en calculant la magnitude de 1 degré carré pour pouvoir les comparer plus aisément avec les résultats antérieurement donnés sur ce sujet. On trouve ainsi (30) :

En 1937 . . . 1,86 magnitude

En 1938 . . . 2,02 magnitude

Ces résultats paraissent en contradiction avec tous ceux des précédents auteurs rassemblés par J. Dufay (1) et qui s'étagent de 3,13 à 5,09 comme magnitude du degré carré et qui sont acquis soit visuellement soit par photographie alors que les mesures photoélectriques d'Elvey (3) ont donné 4,5 magnitude.

Or toutes les mesures des précédents observateurs ont été

faites sur les parties bleu ou bleu-vert du spectre, y compris la mesure d'Elvey qui a utilisé une cellule au potassium. Et si on se reporte à « Couleur » on verra que j'ai trouvé le rapport entre la brillance spectrale moyenne du rouge et du bleu, voisin de 100.

Faudrait-il s'attendre à voir une brillance 100 fois plus grande dans mes mesures que dans les mesures antérieures? Autre contradiction, puisque je trouve une brillance valant seulement environ 10 fois la valeur précédemment admise? Pour expliquer ces résultats il faut examiner de très près les conditions de chaque expérience.

Les auteurs précédents ont fait, pour de très bonnes raisons photométriques, leurs mesures par rapport à des étoiles et le plus souvent par rapport à la polaire dont la température de couleur est évaluée de 6 500° K à 7 000° K. Si nous considérons plus spécialement les mesures photographiques qui correspondent à peu près à mon filtre BG4, soit 3 500-5 000 Å, les comparaisons avec la polaire donnent un rapport que je désignerai par :

$\frac{\text{Ciel nocturne}}{\text{Corps noir 6 500°}}$, dans l'intervalle 3 500-5 000 Å avec longueur d'onde moyenne efficace 4 400 Å ⁽¹⁾.

Mes mesures, toutes autres conditions restant égales, donnent :

$\frac{\text{Ciel nocturne}}{\text{Corps noir 2 100°}}$, dans l'intervalle 5 850-9 000 Å avec longueur d'onde moyenne efficace 7 750 Å.

Il reste maintenant à préciser comment intervient la bou-

(1) On détermine très grossièrement ces longueurs d'onde « efficaces » en cherchant d'abord la moyenne arithmétique des limites extrêmes employées, puis en lui ajoutant une correction qui tient compte de la répartition non uniforme de l'énergie dans l'intervalle considéré. Cette correction n'a pas été calculée sur des bases rigoureuses, mais une variation de 200 Å n'altère pas beaucoup les résultats numériques. Il est donc inutile d'introduire dans son calcul une rigueur que le reste des considérations n'implique pas.

gie. La détermination en bougie de la brillance du ciel résulte généralement des mesures visuelles dont la longueur d'onde moyenne efficace est $5400 \text{ \AA}$. De sorte qu'on peut schématiser cet ensemble de mesures sous la forme suivante :

Résultat des déterminations antérieures :

$$\frac{\text{Ciel nocturne } 4400 \text{ \AA}}{\text{Corps noir } 6500^\circ \text{ K, } 4400 \text{ \AA}} \times \frac{\text{Corps noir } 6500^\circ \text{ K, } 5400 \text{ \AA}}{\text{Bougie } 5400 \text{ \AA}} = 1,1 \times 10^{-8}$$

c'est-à-dire 4,5 comme magnitude du degré carré.

Résultat des déterminations actuelles :

$$\frac{\text{Ciel nocturne } 7750 \text{ \AA}}{\text{Corps noir } 2100^\circ \text{ K, } 7750 \text{ \AA}} \times \frac{\text{Corps noir } 2100^\circ \text{ K, } 5400 \text{ \AA}}{\text{Bougie } 5400 \text{ \AA}} = 11,5 \times 10^{-8}$$

c'est-à-dire 1,9 comme magnitude du degré carré.

On voit qu'il faut multiplier le premier rapport par :

$$\frac{\text{Ciel nocturne } 7750 \text{ \AA}}{\text{Ciel nocturne } 4400 \text{ \AA}} \times \frac{\text{Corps noir } \left\{ \begin{smallmatrix} 6500^\circ \\ 4400 \text{ \AA} \end{smallmatrix} \right\}}{\text{Corps noir } \left\{ \begin{smallmatrix} 6500^\circ \\ 5400 \text{ \AA} \end{smallmatrix} \right\}} \times \frac{\text{Corps noir } \left\{ \begin{smallmatrix} 2100^\circ \\ 5400 \text{ \AA} \end{smallmatrix} \right\}}{\text{Corps noir } \left\{ \begin{smallmatrix} 2100^\circ \\ 7750 \text{ \AA} \end{smallmatrix} \right\}}$$

pour obtenir le deuxième. Or ces trois fractions valent respectivement :

$$100 \quad 1,09 \quad 0,127$$

De sorte qu'en admettant la brillance de $1,1 \times 10^{-8}$ par rapport à la polaire en lumière bleue, on doit s'attendre à trouver :

$$1,1 \times 100 \times 1,09 \times 0,127 \times 10^{-8} = 13,8 \times 10^{-8} \text{ bd/cm}^2$$

pour la brillance mesurée par rapport à un filament à 2100° K , ce qui correspond à une magnitude par degré carré égale à 1,7.

Quoique les nombres ainsi obtenus soient différents des miens ils s'en rapprochent assez pour que nous les considé-

rions comme satisfaisants si on veut bien tenir compte de l'incertitude du calcul ci-dessus.

Il reste à déterminer quel est le genre de mesure le plus intéressant : celui qu'on fait par rapport aux étoiles ou celui qu'on fait par rapport à un corps noir à 2100° ? Il me paraît que ce dernier est le meilleur, au moins dans les limites où j'ai opéré. Comme on l'a vu plus haut, le corps noir le plus rapproché du ciel nocturne au point de vue répartition spectrale est à 2000° K environ. Le plus souhaitable serait de comparer la lumière du ciel avec une source ayant la même température de couleur. Celles que j'ai employées en sont très voisines. Malgré tous les autres inconvénients de la méthode employée je crois qu'on peut conclure à la suite de mes mesures qu'on reproduira un éclaircissement analogue à celui du ciel nocturne moyen en plaçant une lampe à incandescence d'une bougie et de température de couleur 2000° K environ à une distance de 16 ms alors qu'on admettait auparavant (1) 57 m, comme Ch. Fabry.

CHAPITRE VI

Etudes sur le crépuscule.

Pour ces études le photomètre doit posséder une grande rapidité mais peut avoir une sensibilité restreinte.

Le meilleur moyen d'arriver à ces deux résultats simultanément est de diminuer la résistance de fuite.

Dans ce but la résistance normale de $1,4 \cdot 10^{11}$ ohm est shuntée par des résistances plus faibles $2,8 \cdot 10^{10}$ et $5,2 \cdot 10^9$.

Les temps nécessaires pour faire une mesure sont respectivement 1 minute, 12 secondes et 3 secondes environ avec ces 3 résistances par l'appareil n° 1.)

Des jeux de diaphragmes ou même de verres absorbants ont été employés pour les lumières très fortes (ou en cas d'insuffisance du matériel primitif).

La fin du crépuscule a seule pu être étudiée car la lumière était trop forte lorsque la dépression du soleil n'avait pas atteint 4° ou 5° .

Diverses recherches ont été entreprises.

Sans objectif. Etude comparative de la décroissance des lumières filtrées par divers verres colorés en fonction de la dépression du soleil sous l'horizon. Angle solide grand autour du zénith ($0,45$ stéradian).

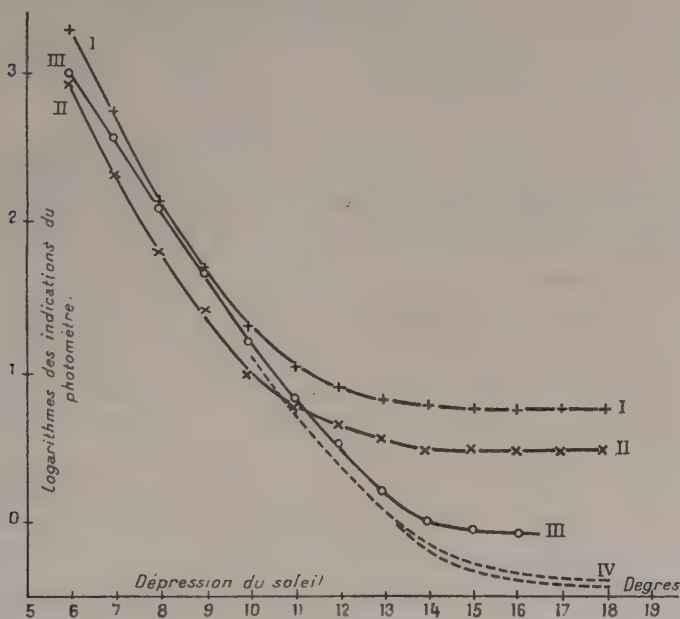
Avec objectif. Même étude que ci-dessus mais limitée au zénith (29 degrés carrés).

Toujours au zénith avec objectif : étude de la loi de décroissance de la lumière donnée par le filtre OG2 employé seul en fonction de la dépression du soleil.

Représentation des résultats. — Toutes les courbes ont

été tracées en coordonnées logarithmiques ordinaires : en ordonnées, le logarithme des déviations de l'électromètre ; en abscisses, la dépression du soleil.

1. Variations de la couleur au cours du crépuscule. — Employant un grand angle solide autour du zénith des mesures ont été faites de janvier à avril 1938 à travers divers filtres colorés substitués les uns aux autres.



- I. Courbe obtenue le 20 mars 1938 région spectrale 5800-9000 Å.
 II. Courbe obtenue le 20 mars 1938 région spectrale 7300-9000 Å.
 III. Courbe obtenue le 20 mars 1938 région spectrale 3600-4600 Å.
 IV. Courbes publiées par J. Dufay (Montpellier et Saint-Geniez, 1923-1924), pôle et zénith ramenés à la même échelle.

Fig. 17.

Les filtres les plus intéressants ont été les suivants :
 Bleu BG4 1 mm. Transmission utile : 3600-4600 Å.
 Rouge OG2 4 mm. Transmission utile : 5850.

88 Wratten. Transmission utile : 7350 (seuil photoélectrique de cellule 9000 Å environ).

Les courbes de la figure 17 ont été obtenues le 20 mars et elles résument les observations intéressantes.

On voit (31) qu'il n'y a d'une courbe rouge à l'autre qu'une différence d'ordonnées. Les courbes I et II représentent donc des lois identiques liant la lumière émise à la dépression du soleil.

Au contraire, en lumière bleue, la courbe III ne pourra être amenée à coïncider avec l'une des deux autres par une simple translation verticale ; il faut, en plus, lui appliquer une translation horizontale valant environ 3°.

Le crépuscule de la lumière rouge évolue donc beaucoup plus vite que celui de la lumière bleue (au moins à la fin). Le crépuscule astronomique bleu est fixé à 18° ; on peut affirmer que le rouge a atteint le même degré d'évolution dès que le soleil est à 15° sous l'horizon.

Quoique faites sur un angle solide petit (et par conséquent forcément un peu différentes par nature) les courbes publiées par Dufay (12) ont été reproduites sur le graphique. On voit qu'elles se rapprochent beaucoup de ma courbe bleue, ce qui est logique.

Sur ces courbes on voit aussi comment le ciel nocturne devient rouge. Il était en effet utile de rechercher quand et comment la couleur du ciel change. La nuit j'ai montré combien le ciel est rouge, mais nos yeux ne lui distinguent pas cette couleur à cause du phénomène de Purkinje. Or au début du crépuscule le ciel est bleu, et son intensité lumineuse est suffisante pour que nos yeux ne nous trompent pas.

On voit que, partant de valeurs comparables jusque vers 8°, le rouge et le bleu se séparent vers 9° ou 10°. *Le bleu continue à décroître alors que le rouge a terminé depuis longtemps son évolution.*

Je n'ai pas cherché pour de multiples raisons à calculer

l'indice de couleur du ciel crépusculaire, à partir des indications de mon photomètre ; la principale est que les domaines spectraux considérés d'habitude en astronomie sont trop différents des miens.

Une indication suggestive peut cependant être tirée de l'examen de ces courbes : c'est la *variation de l'indice de couleur*. On voit qu'entre 8° et 16° l'indice de couleur augmente très sensiblement de deux unités.

L'interprétation de ce fait est certainement liée à la différence de diffusibilité des lumières bleue et rouge.

2. Loi de décroissance de la lumière rouge. — Dans des études entreprises plus tard, vers octobre 1938, j'ai cherché à établir la forme de la courbe de variation du logarithme de la lumière filtrée par le verre OG2 ($5\,850\text{--}9\,000\text{ \AA}$) en fonction de la dépression du soleil.

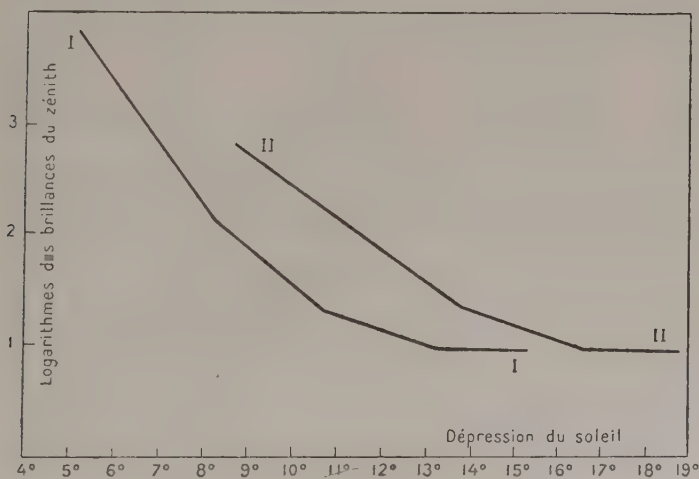


Fig. 18.

- I. Courbe moyenne obtenue à Lyon pour la région $5\,850\text{--}9\,000\text{ \AA}$ (mesures photoélectriques).
- II. Courbe reproduite de W. Brunner (mesures visuelles) ramenée au même minimum.

Le zénith a été seul observé ; toutes les mesures ayant été faites avec l'objectif limitant à 29 degrés carrés la portion utile.

On remarque tout de suite la forme anguleuse des courbes obtenues sur la figure 18 où j'ai tracé la courbe moyenne correspondant à quelques crépuscules.

Les points expérimentaux étaient assez serrés pour donner une indication précise de la forme de la courbe puisque, dans un intervalle d'un degré, 12 lectures ont été faites en moyenne.

La courbe obtenue (courbe I) peut s'interpréter à partir de 5° comme formée de 4 droites dont les limites et les pentes seraient :

Limites		Pentes en magnitude par degré de dépression solaire
5°	8°20'	1,5
8°20'	10°30'	0,83
10°30'	13°20'	0,35
13°20'		négligeable

Il est curieux de remarquer que les trois premières pentes se déduisent approximativement l'une de l'autre en divisant par 2.

De telles cassures ont été signalées par W. Brunner (32) dans des études visuelles et la courbe moyenne (courbe II) qu'il publie a été reproduite à la même échelle que la mienne. La fin des deux courbes peut être amenée en coïncidence par une translation verticale convenable et par une translation horizontale de 3°. Ce résultat confirme l'étude faite au paragraphe premier. La fin de la courbe de Brunner est certainement relative au bleu et on retrouve la différence de 3° déjà vue, mais mieux définie ici grâce à la position bien déterminée des cassures de chaque courbe. Il semblerait que, d'après les deux derniers points anguleux, on

puisse prendre $3^{\circ}15'$ comme décalage des courbes bleue et rouge. L'origine de ces discontinuités est inconnue. La lumière du crépuscule peut provenir de :

- la diffusion primaire par l'air éclairé par le soleil ;
- la diffusion secondaire par l'air éclairé par le ciel voisin ;
- l'émission par des couches fluorescentes dans la haute atmosphère.

Link a publié (33) en 1934 un travail où il établit que d'après la diffusion primaire la pente de la courbe logarithmique est indépendante de la longueur d'onde. Cela est en accord avec le début des courbes de la figure 18 jusque vers 10° et partiellement en accord avec le début des courbes de la figure 17 jusque vers la même limite. Poursuivant son raisonnement Link arrive à une conclusion identique pour la diffusion secondaire.

Ce résultat est en contradiction avec mes observations. La diffusion secondaire est certainement cause prépondérante de la lumière de la fin du crépuscule. Mes courbes montrent que la pente dépend considérablement de la longueur d'onde. Il faudrait comprendre par là que les hypothèses faites par Link dans son calcul sur la diffusion primaire sont fondées, et que celles qu'il introduit sur la diffusion secondaire sont plus hasardeuses.

Il semble bien cependant que des résultats intéressants soient à attendre de l'étude crépusculaire telle que je l'ai pratiquée, principalement au point de vue du sondage de la haute atmosphère. Les expériences et les calculs à faire sur ce sujet constituent malheureusement un ensemble assez considérable qui ne peut avoir place dans le cadre du travail actuel. Ils feront l'objet de publications ultérieures.

CONCLUSION

La première difficulté rencontrée dans l'étude photoélectrique de la lumière du ciel nocturne est la faiblesse des courants à mesurer.

Leur ordre de grandeur est 10^{-12} ampère. La sensibilité des appareils doit donc être portée aux environs de 10^{-14} ampère. La difficulté n'est pas grave dans un laboratoire où l'on fait, à température à peu près fixe, des mesures dont la durée n'est que de quelques dizaines de minutes.

Dans le cas actuel le but était d'avoir un photomètre enregistreur placé dehors et fonctionnant sans surveillance, d'une manière entièrement automatique. Les variations de température sont inévitables, aussi bien au cours d'une nuit que d'une saison à l'autre. De plus, un enregistreur doit fonctionner toute la nuit, c'est-à-dire pendant une dizaine d'heures. Toutes ces conditions rendent la réalisation plus délicate.

La méthode employée ici consiste à faire débiter la cellule photoélectrique sur une résistance de fuite et à mesurer avec un électromètre la différence de potentiel ainsi créée. Ce procédé a donné un fonctionnement assez souple et assez sûr pour permettre des enregistrements réguliers toutes les fois que l'état du ciel le permettait. On a vu comment j'ai rendu l'appareil entièrement automatique. Il a toujours fonctionné seul, sans aucune surveillance.

Les cellules photoélectriques employées sont au césium ou au rubidium. Elles ont une sensibilité intéressante dans le rouge et le proche infra-rouge. Aussi, avec l'aide de quelques filtres colorés, des résultats importants ont-ils été acquis sur ces régions spectrales encore assez mal connues.

J'ai mis en évidence l'énorme importance des radiations de grande longueur d'onde. Pressentie par certains auteurs elle n'avait jamais été mesurée avec sa valeur réelle, qui rapproche le rayonnement du ciel nocturne de celui du corps noir à 2 000° K. Evidemment cela s'entend de l'intervalle compris entre 3 500 Å et 9 000 Å, limites du domaine étudié.

Une telle quantité d'énergie vers l'extrémité rouge du spectre laissait penser qu'il y avait lieu de retoucher la valeur précédemment admise pour la brillance moyenne du ciel nocturne. De fait les mesures ont donné la valeur de 10^{-7} bougie par centimètre carré environ. Sous une autre forme on peut dire que l'éclairement produit par le ciel nocturne est comparable à celui d'une bougie placée à 16 m.

L'appareil utilisé a donné également des résultats sur les variations de la brillance et de la couleur du ciel, plus spécialement pour les longueurs d'onde comprises entre 5 800 Å et 9 000 Å. Lord Rayleigh et Spencer Jones avaient donné une formule concernant les variations annuelles. On calcule à partir de mes résultats une formule en excellent accord avec elle. Le maximum d'automne se retrouve sensiblement en coïncidence avec celui de Lord Rayleigh. Au cours d'une nuit, la brillance semble passer par un minimum peu accusé vers le milieu de la nuit. Quant aux variations de la couleur, elles paraissent liées aux variations de la raie 6 300 Å. L'interprétation de toutes ces observations est rendue difficile par les nombreuses irrégularités habituellement constatées dans la luminosité du ciel nocturne. Les mesures ont été faites par comparaison avec une lampe faible, fonctionnant à résistance constante, et comparée elle-même périodiquement avec une lampe étalon.

Il était également intéressant de connaître comment la couleur du ciel passe du bleu diurne au rougeâtre nocturne. Nos yeux ne nous donnent aucun renseignement à cause du phénomène de Purkinje. J'ai donc étudié le crépuscule après avoir rendu le photomètre assez rapide pour pouvoir suivre

de près l'évolution crépusculaire. Il a été ainsi établi que le rouge cessait de décroître bien avant le bleu. Le crépuscule de la région rouge se termine lorsque le soleil est environ à 14° sous l'horizon alors que le crépuscule bleu se prolonge jusque vers 17° . Une différence de 3° sépare la fin de l'évolution des crépuscules des deux régions extrêmes du spectre visible ; cette différence correspond à un temps variable de l'ordre du quart d'heure. Les observations ont été commencées lorsque le soleil est à 4° ou 5° sous l'horizon. A ce moment le rouge et le bleu subissent des évolutions sensiblement parallèles conformément aux théories de Link. Aux environs de 9° les courbes se différencient nettement. L'indice de couleur du ciel augmente de deux unités environ.

De curieuses discontinuités ont été constatées dans l'évolution de la lumière à la fin du crépuscule. Une étude approfondie de ces particularités donnerait probablement des renseignements sur la haute atmosphère.

Ces études ont permis de préciser nos connaissances sur les grandes longueurs d'onde visibles et le proche infrarouge, tant pour la lumière nocturne que pour le crépuscule.

Certains résultats, comme ceux qui concernent les variations annuelles, ne sont que la confirmation d'observations antérieures ; d'autres, comme la détermination de la couleur du ciel, ont apporté d'utiles précisions sur des faits déjà entrevus ; enfin certaines conclusions sont entièrement nouvelles et modifient notablement les idées antérieures sur la brillance du ciel nocturne et l'évolution de la fin du crépuscule.

BIBLIOGRAPHIE

1. CH. FABRY, J. DUFAY, J. COJAN. — Etude de la lumière du fond du ciel nocturne. *Revue d'Optique*, 3, Bd Pasteur, Paris (1934), éditeur.
2. LORD RAYLEIGH. — *Proceedings of Royal Society London*, A, **124** (1929), 395.
3. C. T. ELVEY, O. STRUVE. — *Astrophysical Journal*, **83** (1936), 162.
4. C. T. ELVEY, F. E. ROACH. — *Astrophysical Journal*, **85** (1937), 213.
5. R. GRANDMONTAGNE. — *Revue d'Optique* (à paraître).
6. R. GRANDMONTAGNE. — 68^e Congrès des Sociétés savantes (1935), 113.
7. R. GRANDMONTAGNE. — *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 381 (1936), 10 S.
8. R. GRANDMONTAGNE. — *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 396 (1936), 174 S.
9. R. GRANDMONTAGNE. — *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 425 (1938), 141 S.
10. G. RIBAUD. — *Traité de pyrométrie optique*, Editions de la *Revue d'Optique*. Paris.
11. G. RIBAUD. — *Mémorial des Sciences physiques*, **9** (1929), 19.
12. J. DUFAY. — *Bulletin de l'Observatoire de Lyon*, **10** (1928), 102.
13. J. CABANNES. — *Journal de Physique*, **5** (1934), 605.
14. R. GRANDMONTAGNE. — *Comptes rendus Académie des Sciences*, **204** (1937), 337 et **207** (1938), 275.
15. V. M. SLIPHER. — *Publ. Astron. Soc. Pacific.*, **41** (1929), 262.
16. L. A. SOMMER. — *Zeits. für Physik*, **77** (1932), 374.
17. H. GARRIGUE. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, **202** (1936), 1807.
18. CH. FABRY. — Introduction générale à la photométrie. *Revue d'Optique*, 3, Bd Pasteur, Paris (1927), éditeur.
19. LORD RAYLEIGH. — *Proceedings of Royal Society of London*, A, **99** (1921), 10.
20. LORD RAYLEIGH. — *Proceedings of Royal Society of London*, A, **106** (1924), 117.

21. J. DUFAY, WANG SHIH KY. — *Journal des Observateurs*, **18** (1935), 193.
 22. GRANDMONTAGNE. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, **207** (1938), 321.
 23. LORD RAYLEIGH, SPENCER JONES. — *Proceedings of Royal Society of London*, A, **151** (1935), 22.
 24. R. GRANDMONTAGNE. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, **207** (1938), 321.
 25. H. GARRIGUE. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, **205** (1937), 491.
 26. J. RUDNICK. — *Astrophysical Journal*, **86** (1937), 212.
 27. J. C. MC LENNAN, J. H. MC LEOD, H. J. C. IRETON. — *Transactions of Royal Society Canada*, **22** (1928), 397.
 28. LORD RAYLEIGH, SPENCER JONES. — *Proceedings of Royal Society of London*, A, **126** (1930), 246.
 29. H. GARRIGUE. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, **198** (1934), 1398.
 30. R. GRANDMONTAGNE. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, **209** (1939), 1135.
 31. R. GRANDMONTAGNE. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, **207** (1938), 1437.
 32. W. BRUNNER. — *Publ. Eidgen. Sternwarte Zürich*, **6** (1935).
 33. M. F. LINK. — *Journal des Observateurs*, **8** (1934), 161.
 34. J. DUFAY. — *Transactions of International Astronomical Union*, **6** (1938), 164.
-

APPENDICE

Remarques sur les mesures de très faibles flux lumineux et de très faibles éclairéments.

Dans mes mesures j'ai enregistré des éclairéments valant environ un dix-millième de lux lorsque la cellule était exposée directement à la lumière du ciel nocturne. L'éclairément mesuré par l'appareil muni de son objectif était environ cent fois plus faible, et la sensibilité limite correspond à peu près au centième de la grandeur mesurée.

Il en résulte que, dans leur état actuel (destination à l'enregistrement), les appareils permettent d'apprécier le cent-millionième de lux avec des flux lumineux du milliardième de lumen.

Mes mesures étant faites sur des sources dont la température de couleur est voisine de $2\,100^{\circ}\text{K}$ on peut admettre que ces conclusions sont encore valables pour le système standard correspondant à $2\,600^{\circ}\text{K}$. Mais il serait de toutes façons imprudent de les appliquer sans discernement en astronomie sur des étoiles à température de couleur élevée.

Les chiffres qui viennent d'être donnés sont les limites de sensibilité réellement atteintes sur mes appareils ; mais, sans modification du principe, on peut aller beaucoup plus loin à la seule condition de se limiter à des mesures de laboratoire, avec des appareils protégés contre les variations de température et que l'on surveillerait continuellement.

Sans rien changer à la technique, on pourrait obtenir par ce procédé une sensibilité cent fois meilleure.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION.	2
PRÉLIMINAIRES	4
Appareillage	8
Couleur du ciel nocturne	25
Variations de la brillance et de la couleur du ciel nocturne.	30
Evaluation photoélectrique de la brillance du ciel nocturne	39
Etudes sur le crépuscule. Variation de couleur. Loi de décroissance des radiations rouges	46
CONCLUSION	52
BIBLIOGRAPHIE	55
APPENDICE	57

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

La couronne solaire.

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 4 Mars 1941.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

CH. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

*Le Doyen de la Faculté des Sciences
chargé des fonctions de Recteur de
l'Académie de Paris,*

CH. MAURAIN.

